

討14

純鉄の変形応力に対する一考察

京都大学工学部 ○富井洋一
 京都大学工学部 高村仁一
 川崎製鉄 技研 小西元幸
 京都大学大学院 関信博

金属の変形応力、とくにBCC金属のそれは顕著な温度依存性を示すことはよく知られている。これについては現在までに種々の考え方が提案されているが、まだ完全な理解には到達していない。本研究は予歪を与えた純鉄多結晶体の再荷重時における微小変形領域を電気抵抗的にくわしく調べ、その変形応力の温度依存性に対する一考察を加えようとしたものである。

試料および実験方法

試料はジョンソンマッセイ社製純鉄を素材(表1)とし、1mm中に冷間線引後、高純度水素によって処理したもので、粒径はほぼ0.1mmφ、室温と液体He温度での電気抵抗の比は250~270(磁場なし)程度であり、固溶炭素と窒素は1ppm以下である。電気抵抗の測定は、高感度の低電圧電位差計が用いられ、すべて除荷重状態で行われた。測定誤差は $1 \times 10^{-10} \Omega \text{cm}$ 以内である。試片の変形はインストロン型引張試験機によって与えられた。このときの試片の微小歪はマナーセンの方測¹⁰⁾を利用して、異なる2温度で電気抵抗を測定することによって求められた。

表 1. CHEMICAL COMPOSITIONS AS RECEIVED

C	N	O	P	S	Mn	Si
0.004	0.0222	0.0042	<0.001	0.002	<0.001	0.001

wt.%

“再荷重時の微視的降伏応力” (以下 σ_m と呼ぶ)

試片にある温度で予歪を与え、必要ならば適当な温度で時効した後、再荷重時の応力の増加に伴う電気抵抗の増加量を除荷重状態で測定する。この際、電気抵抗が増加し始める微小変形応力を σ_m と定める。例えば、図1における σ_m は、25℃で0.5%、3.0%、10.0%の予歪(ϵ_p)を与えた後、液体窒素中で再荷重した場合のものである。また同図に示されている σ_Y は電気抵抗が急激に増加する応力で、いわゆる巨視的降伏応力に対するものである。

さらに、図の電気抵抗増加はすべて除荷重状態の測定であるから、格子欠陥の増加に起因するもののみで、弾性歪や、磁歪によるものは含まない。

実験結果

(1) 高純度鉄は液体窒素温度のような低温では双晶変形により降伏し、低温域では一様な変形を得ることは困難である。しかし図1に示されているような比較的高温で予歪を与えておけば、この困難さは除くことができる。1において σ_m は25℃での予歪時の変形応力(σ_{ϵ_p})に等しい。すなわち

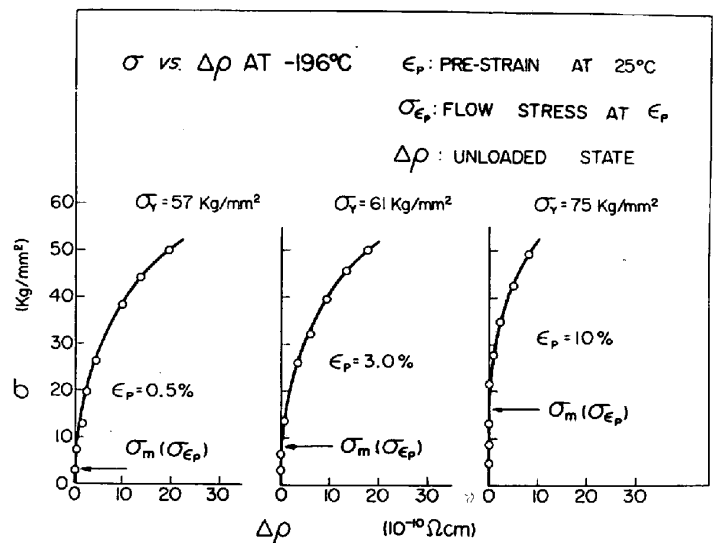


図 1

$\sigma_m = \sigma_{ep}$ である。この関係は予歪の量を一定にして (例えば $\epsilon_p = 3.0\%$)、予歪温度を変化させた場合にも成り立つことが確かめられている。

- (2) 図2は77°Kで6%の予歪を与えた後、熱効させることなく再荷重した場合と、25°Cで7時間熱効させた後再荷重した場合の電気抵抗変化を示すもので、これに対応する応力-歪曲線の模式的な図が右側に示されている。この図から明らかのように、予歪後の σ_m は室温熱効により 50 Kg/mm^2 近く低下している。つぎにこのような熱効処理による σ_m の低下を各温度で等時性的に示したのが Fig. 3 である。-100°C までの σ_m が急速に低下することが明らかである。さらに同じ温度範囲で試片の電気抵抗の変化を示したのが 図4 である。この図で明瞭な回復の stage を示す -140°C 付近および -50°C 付近で、slope-change method で求めた活性化エネルギーは、それぞれ、 $0.25 \pm 0.1 \text{ eV}$ および $0.7 \pm 0.2 \text{ eV}$ である。

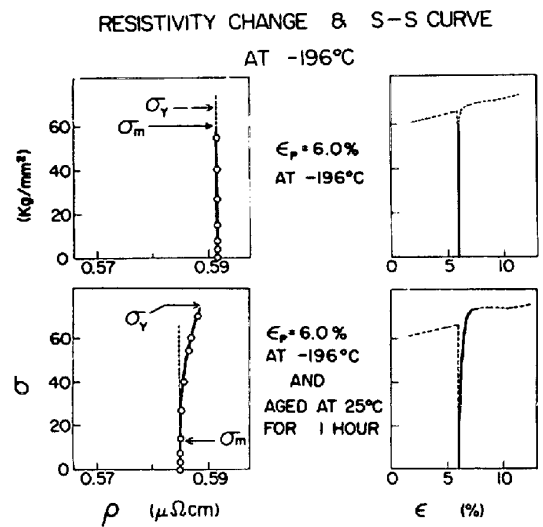


図 2

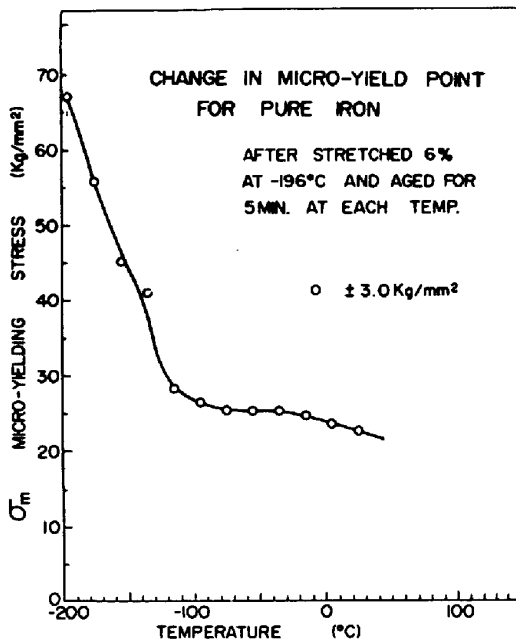


図 3

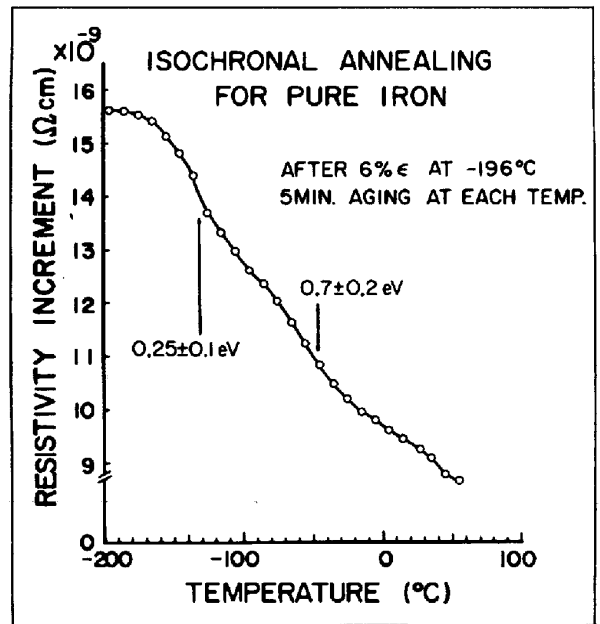


図 4

- (3) 図5は電気抵抗の2温度測定から試片の永久伸びを精密に求めることができることを利用して σ_m から σ_y までの微小変形領域と、 σ_y 以後の巨視的変形領域との応力-歪曲線を対数で示したものである。興味あることは2つの領域の応力-歪曲線における ϵ^n の指数が $\epsilon = 0.2\%$ を境として明瞭に異なっていることである。このことは2つの領域における変形の機構が異なっていることを示唆している。従って巨視的降伏点とも云うべき、真に物理的に意味のある応力としては、 σ_y よりむしろ σ_m ($\epsilon = 0.2\%$ における応力) をとるべきであろう。
- (4) 図6は 図5と同じ試片の微小変形領域と巨視変形領域とにおける電気抵抗の増加と、その後の25°Cでの熱効による抵抗減少を示したものである。注目すべきことは $\epsilon = 0.2\%$ (σ_m) までの

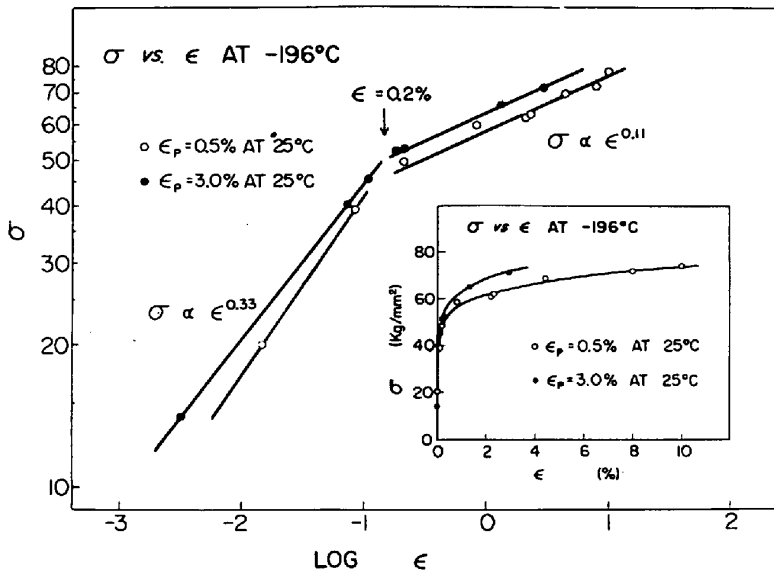


図5

微小変形領域を増加した電気抵抗は、ほとんど25°Cでの時効により回復し去っているのに対し、 σ_M を越える変形に対しては回復しない量が存在することである。

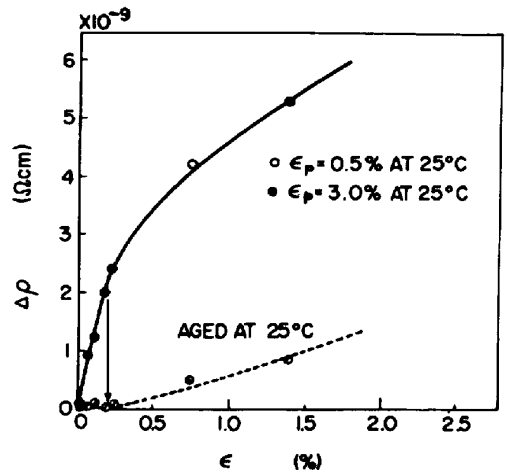


図6 室温時効による電気抵抗の回復

考察

以上の実験結果を要約すれば次のとおりである。

- (a) : 予歪後の再荷重時における微小変形領域は σ_M で始まり $\sigma_M(\epsilon=0.2\%)$ で終る。 $\epsilon=0.2\%$ 以下と以上の二つの領域では変形機構が明瞭に異なる。(図5)
- (b) : 再荷重温度(T)が予歪を与えた温度(T_{ep})より低い場合は、 $\sigma_M \approx \sigma_{ep}$ であり、逆にTが T_{ep} より高い場合には $\sigma_M < \sigma_{ep}$ となり、かつ、 $\sigma_{ep} \approx \sigma_M$ である。(図1, 図2)
- (c) : σ_M より σ_M までの微小変形領域における電気抵抗増加量の大部分は、室温までの時効により回復する。(図6)
- (d) : 77°Kで予歪を与えた試片の、昇温時効による σ_M の低下の大部分は -100°C まで起こる。(図3)
- (e) : 77°Kで予歪を与えた試片における電気抵抗の回復の stage は -140°C 付近 ($0.25 \pm 0.1 eV$) および -50°C 付近 ($0.7 \pm 0.2 eV$) に見られる。

以上から明らかたように σ_M の応力と転位は動きはじめ、しかもこの σ_M の大きさは予歪量、とりまなおす転位密度と密接な関係をもつことを示唆している。とくに注目すべきことは、 σ_M の大きさは再荷重温度に殆んど支配されないのに対して、 σ_M の値は著しく再荷重温度に影響される。すなわち σ_M は既存の転位密度で一義的に説明される性質のものではない。換言すれば、変形応力の温度依存性は σ_M から σ_M までの微小変形領域の存在に起因すると考えられる。なお、微量の固溶炭素や空素の存在が上述のような昇温時効による σ_M の変化を説明し得ないことはその変化温度範囲、ならびに活性化エネルギーの値からみても明瞭である。

それならば、 σ_M から σ_M までの微小変形領域における活性化過程の要因は何であろうか?

まず第一に考えられるのは転位の運動(簡単に考えれば bow-out)におけるキンクモデルのような活性化過程である。この場合 図6に示される $\epsilon=0.2\%$ までのほぼ完全な回復過程は bow-out した転位の長さの収縮過程として理解されねばならない。しかしながら、微小変形領域を転位移動モデルのみによつて、上記まとめの各次の実験事実を矛盾なく説明することは困難である。例えば、一般に信じられて

いる流注化エネルギーをもつては上記の (d), (e) 項の事実を説明することはできない。また図1のよとのみである (b) 項における $\sigma_m = \sigma_{ep}$ の説明の理由がない。転位移動モデルのみが支配的ならば $\sigma_m < \sigma_{ep}$ の筈である。さらに微小変形領域における電気抵抗の増加量のすべてを bow-out モデルによる転位の長さの増加量で説明することは困難である。このように転位の移動モデルのみをもつて、 σ_m から σ_M までの微小変形領域の熱活性化過程を説明するためには多くの困難が伴う。

そこで第二の可能性として予歪時に形成された転位のジョグの非保存運動による熱活性化過程を挙げる事ができる。この観点に立てば 微小変形域では多数の欠陥が形成され、これらの欠陥のうち移動エネルギーの小さい格子間原子の役割がクローズアップされる。これによつて、上記の (c), (d), (e) 項の実験事実は容易に理解される。すなわち、欠陥と転位の相互作用が変形応力の温度依存性に對して大きな役割をもつことが指摘される。さらにこのことは上記の (a), (b) 項と矛盾するものではない。

このように考えると変形応力の温度依存性を問題にするときには、転位の移動モデルのみでなく、欠陥の役割を考慮したモデルによる方がより深い理解を与えると思われる。

文献

- 1) A. H. Cottrell and B. A. Bilby, : Proc. Phys. A62 (1949) 49
- 2) D. F. Stein and J. R. Low, Jr., : Acta Met. 14 (1966) 1183
- 3) G. Schöck and A. Seeger : Acta Met. 7 (1959) 469
- 4) J. Heslop and N. J. Petch : Phil. Mag. 1 (1956) 866
- 5) H. Conrad : 1963, N. P. L. Symp. The Relation between the Structure and Mechanical Properties of Metals (H. M. S. O. London)
- 6) J. R. Low, Jr. and R. W. Guard : Acta Met. 7 (1959) 177
- 7) D. F. Stein and J. R. Low, Jr. : J. Appl. Phys. 31 (1960) 862
- 8) G. Schöck : Acta Met. 9 (1961) 382
- 9) N. Brown and K. F. Ekwall : Acta Met. 10 (1962) 1101
- 10) Matthiessen and Hergt : Annnd. Phys. u. Chem. 122 (1864) 19